

JURNAL RISET TEKNOLOGI INDUSTRI

**ANALISIS KINERJA REAKTOR UNGGUN TETAP UNTUK PRODUKSI
HIDROGEN MELALUI REAKSI STEAM REFORMING ETANOL****PERFORMANCE ANALYSIS OF FIXED BED REACTOR FOR HYDROGEN
PRODUCTION THROUGH ETHANOL STEAM REFORMING**

**Tri Hadi Jatmiko¹, Dwi Joko Prasetyo¹, Muhammad Khairudin,²
Nurul Abdillah Pulungan²**

¹Balai Penelitian Teknologi Bahan Alam, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jalan Yogyakarta-Wonosari KM 31,5 Desa Gading, Kec. Playen, Kab. Gunungkidul, D.I.Y
Telepon: 0274 392570/Faks: 0274 391168

²Teknik Kimia Institut Teknologi Medan, Jl. Gedung Arca No. 52, Medan
e-mail: trih011@lipi.go.id

Diterima : 25-01-2018

Direvisi : 06-06-2018

Disetujui : 21-06-2018

ABSTRAK

Reaktor unggun tetap merupakan jenis reaktor yang banyak digunakan untuk reaksi yang menggunakan katalis padat, salah satunya adalah reaksi *steam reforming*. Reaksi *steam reforming* merupakan salah satu proses pembuatan gas hidrogen dari bahan yang mengandung karbon seperti biomassa dan etanol dengan menggunakan katalis yang selanjutnya bisa digunakan sebagai sumber energi alternatif yang ramah terhadap lingkungan maupun sebagai bahan baku kimia. Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi reaktor unggun tetap untuk menganalisa kinerja dari reaktor unggun tetap untuk produksi hydrogen dari etanol melalui reaksi *steam reforming*. Model yang digunakan adalah model pseudohomogen dua dimensi dengan model dispersi, kondisi operasi *steady state*, adiabatik dan fasa gas mengikuti hukum gas ideal. Dari hasil simulasi didapatkan informasi bahwa kenaikan temperatur dari 593 K hingga 743 K meningkatkan konversi reaksi dari 36,64% menjadi 40,42%. Kenaikan kecepatan superfisial dari $0,63 \times 10^{-5}$ hingga $4,23 \times 10^{-5}$ m/s menghasilkan konversi reaksi turun dari 82,69% menjadi 27,81%. Perubahan konsentrasi etanol yang dimasukkan ke reaktor dari $5,71 \times 10^{-5}$ mol/m³ hingga $1,49 \times 10^{-4}$ mol/m³ meningkatkan konversi reaksi dari 65,84% hingga 99,41%. Dan kenaikan rasio H₂O/C₂H₅OH dari 3,0 hingga 11,0 meningkatkan konversi reaksi dari 56,74% menjadi 99,20%. Model reaktor unggun tetap untuk reaksi *steam reforming* etanol dapat digunakan untuk memprediksi kinerja reaktor dengan baik.

Kata Kunci: steam reforming, etanol, hidrogen, reaktor unggun tetap

ABSTRACT

The fixed bed reactor is a type of reactor widely used for reactions using solid catalysts, one of which is a steam reforming reaction. Steam reforming reaction is a process of producing hydrogen from carbon-containing materials such as biomass and ethanol, by using a catalyst which can later be used as an alternative energy source that is environmental friendly. In this study, carried out the construction of a mathematical model and simulation of fixed bed reactor for performance analysis of fixed bed reactor for hydrogen production through ethanol steam reforming. The model used is pseudohomogeneous two-dimensional dispersion model, with steady state operating conditions, adiabatic and the gas phase following the ideal gas law. Result from simulation show that rising temperatures from 593 to 743 K increased the conversion reaction from 36,64% to 40,42%. The increase in superficial velocity $0,63 \times 10^{-5}$ to $4,23 \times 10^{-5}$ m/s decreased conversion reaction from 82,69 to 27,81%. Changes in the concentration of ethanol from $5,713 \times 10^{-5}$ to $1,4913 \times 10^{-4}$ mol/m³ increased the conversion reaction from 65,84 to 99,41%. And increasing ratio of H₂O / C₂H₅OH from 3.0 to 11.0

increase conversion reaction of 56,74% into 99,20%. Model fixed bed reactor for ethanol steam reforming can be used to predict the performance of the reactor well.

Keywords: steam reforming, ethanol, hydrogen, fixed bed reactor

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan gaya hidup modern (Asif & Muneer, 2007). Dalam Energi Outlook Indonesia 2016, Dewan Energi Nasional memperkirakan pertumbuhan permintaan energi hingga tahun 2050 meningkat rata-rata 4,9 % per tahun (Abdurrahman, 2016). Dalam hal ini, hidrogen (H_2) memiliki potensi masa depan yang signifikan sebagai bahan bakar alternatif yang dapat memecahkan masalah emisi CO_2 . Hidrogen sebagai salah satu sumber energi alternatif memiliki kelebihan yaitu tersedia melimpah, tidak beracun dan kandungan energi yang tinggi (Bshish, Yaakob, Narayanan, Ramakrishnan, & Ebshish, 2011; Cortright, Davda, & Dumesic, 2002; Mazloomi & Gomes, 2012). Hidrogen juga bisa digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik, *fuel cell* untuk kendaraan maupun untuk peralatan *portable* (Dutta, 2014).

Hidrogen dapat dihasilkan melalui proses fotolisis, elektrolisis maupun proses termokimia (Holladay, Hu, King, & Wang, 2009). Proses termokimia yang paling banyak digunakan adalah *steam reforming* hidrokarbon (Bshish et al., 2011; Kumar, Prasad, & Sharma, 2014; Rabenstein & Hacker, 2008). Etanol adalah suatu bentuk hidrokarbon yang mudah diproduksi, bebas dari sulfur, memiliki toksisitas rendah, dan juga aman untuk ditangani dan disimpan (Rabenstein & Hacker, 2008).

Untuk melakukan proses produksi hidrogen memerlukan suatu reaktor yang merupakan hal terpenting dalam proses kimia dimana reaktor merupakan tempat terjadinya proses perubahan bahan mentah menjadi produk. Pada umumnya masalah yang utama dalam suatu industri sebelum menjalankan operasinya adalah bagaimana pemilihan reaktor yang akan digunakan berdasarkan reaksi kimia yang ada,

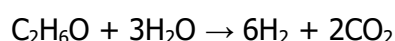
menentukan ukuran reaktor, serta bagaimana menentukan kondisi operasi yang terbaik. Akhirnya dapat dibuat suatu sistem untuk mengontrol variabel-variabel ini selama menjalankan proses. Dalam hal ini, reaktor yang digunakan adalah reaktor unggun tetap. Rancangan reaktor unggun tetap memiliki kelebihan diantaranya adalah bentuknya sederhana, fleksibel, dan mudah di *scale-up*. Reaktor unggun tetap adalah suatu reaktor berbentuk pipa besar yang didalamnya berisi katalisator padat yang digunakan untuk reaksi fasa gas dengan katalisator padat. Apabila diperlukan proses transfer panas yang cukup besar biasanya berbentuk *multitube* (Froment & Bischoff, 1990). Namun untuk melakukan percobaan ini sangat membutuhkan biaya, waktu dan energi yang sangat besar untuk memperoleh hasil kondisi operasi yang baik atau optimum dalam pembuatan hidrogen ini.

Mengacu pada hal tersebut diatas peneliti mencoba untuk melakukan penelitian tentang pemodelan dan simulasi reaktor unggun tetap untuk reaksi *steam reforming* etanol menjadi gas hidrogen. Dengan adanya suatu model dan simulasi dapat mengurangi resiko bahaya dan bisa menghemat waktu dan biaya dalam menganalisa kinerja reaktor unggun tetap untuk reaksi steam reforming etanol menjadi gas hidrogen. Dengan bantuan model dan simulasi yang dapat dilakukan dengan bantuan komputer maka analisa kinerja reaktor dapat dilakukan dalam beberapa jam saja dan tentunya biaya yang dikeluarkan sangat sedikit.

Pemodelan untuk reaktor unggun tetap telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya diantaranya Fernandes (2006) melakukan pemodelan reaktor unggun tetap untuk reaksi Fischer Tropsch dengan model *plug flow* tanpa memperhitungkan faktor hidrodinamika, konveksi dan dispersi (Mazzone & Fernandes, 2006). Arteaga dkk

(2009) melakukan optimasi dan simulasi reaksi *steam reforming* tanpa mempertimbangkan faktor hidrodinamika (Arteaga, Peralta, Casas, & Castro, 2009). Sadooghi dan Rauch (2015) melakukan pemodelan reaktor unggun tetap untuk produksi hidrogen dari campuran gas metana dan hidrogen sulfida dengan asumsi pendekatan reaktor *plug flow* (Sadooghi & Rauch, 2015). Tripodi dkk. (2017) melakukan simulasi proses produksi hidrogen secara keseluruhan tanpa memperhitungkan kinerja reaktor secara khusus (Tripodi, Compagnoni, Ramis, & Rossetti, 2017). Berdasarkan kajian terdahulu maka penelitian ini mencoba mengembangkan model reaktor unggun tetap untuk reaksi *steam reforming* etanol menjadi gas hidrogen dengan model pseudohomogen dan mempertimbangkan faktor hidrodinamika di dalam reaktor.

Proses *steam reforming* etanol melibatkan reaksi antara etanol dan air dengan katalis logam yang mampu memecahkan ikatan C-C dalam etanol untuk menghasilkan campuran H_2 dan CO_2 . Katalis logam yang banyak digunakan untuk reaksi *steam reforming* etanol, berdasarkan pada logam mulia (Rh, Pt dan Pd) dan pada logam transisi (Ni, Co, Cu, Ni). Katalis Ni dan Co lebih menarik karena lebih ekonomis tetapi menunjukkan kinerja dan stabilitas yang sebanding dengan katalis dari logam mulia (Akande, Aboudheir, Idem, & Dalai, 2006; Pinton, Vidal, Signoretto, Martínez-Arias, & Cortés Corberán, 2017). Reaksi ini sangat endoterm dengan entalpi standar, $\Delta H_{298}^\circ = +173,3 \text{ kJ/mol}$ (Bshish et al., 2011; Pinton et al., 2017) dan terjadi pada suhu relatif lebih tinggi, biasanya antara 300 dan 520 °C (Bshish et al., 2011). Reaksi ini dianggap sebagai kombinasi dari *steam reforming* untuk *syngas* diikuti oleh *Water Gas Shift* (WGS) dengan persamaan umum



Kinetika reaksi *steam reforming* etanol

$$r = K_0 e^{-E/RT} [C_A]^n$$

dengan nilai $K_0 = 3,12 \times 10^{-2}$; $E = 4.41 \times 10^3 \text{ kJ/mol}$ dan $n = 0,43$ (Akande et al., 2006).

Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis kinerja reaktor unggun tetap untuk reaksi *steam reforming*. Analisis kinerja reaktor unggun tetap dilakukan dengan model matematis. Model yang digunakan adalah model pseudohomogen dengan memperhatikan faktor hidrodinamika yaitu dispersi, kondisi operasi *steady state*, adiabatik dan fasa gas mengikuti hukum gas ideal. Kemudian dilakukan simulasi untuk mengetahui kinerja reaktor unggun tetap untuk reaksi *steam reforming* pada berbagai kondisi operasi.

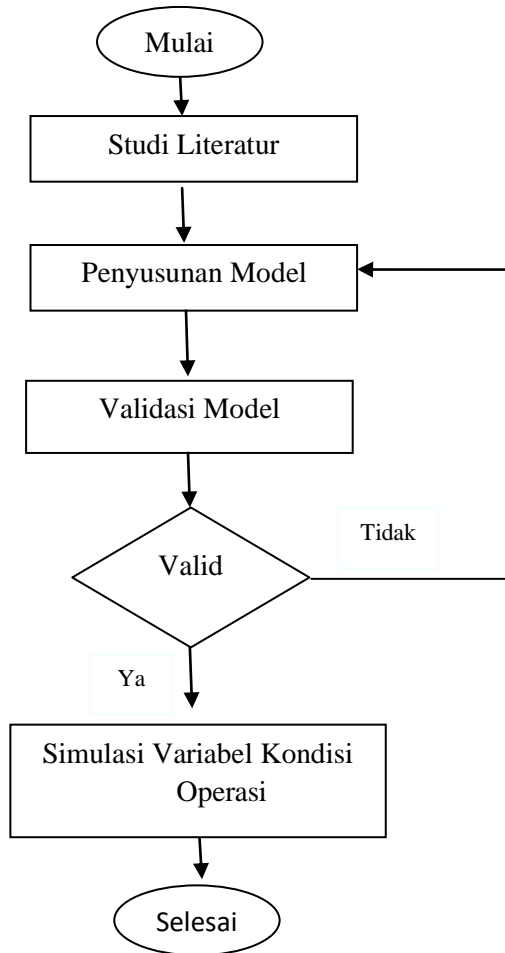
BAHAN DAN METODE

Penelitian yang dilakukan terdiri dari beberapa langkah yang dilaksanakan secara bertahap, diawali dengan mengumpulkan data-data dan parameter yang diperlukan dalam menyusun model diantaranya teori pendukung tentang reaksi *reforming*, persamaan kinetika reaksi *reforming*, data percobaan sebagai bahan untuk melakukan validasi model yang didapatkan.

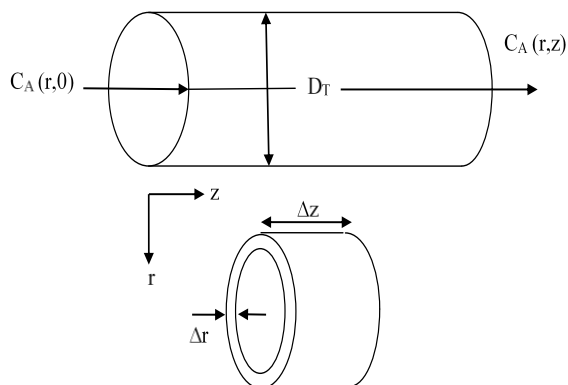
Menyusun model matematis dari sistem reaktor unggun tetap yang terdiri dari neraca massa yang memperhitungkan faktor konveksi dan dispersi sehingga didapatkan sistem persamaan diferensial. Menyelesaikan model matematis yang telah disusun dengan metode numerik dengan bantuan komputer dan melakukan validasi serta simulasi untuk mengetahui pengaruh kondisi operasi terhadap kinerja reaktor.

Model Reaktor Unggun Tetap

Sebuah reaktor berbentuk silinder dengan diameter dalam D_T yang berisi unggun padatan katalis berdiameter d_p di dalamnya dengan panjang tertentu pada koordinat aksial z dan elemen diferensial berbentuk cincin yang diperbesar dengan tebal Δr dan panjang Δz .



Gambar 1. Diagram Alir Percobaan



Gambar 2. Reaktor Unggun Tetap dan Elemen Diferensial

Konsentrasi reaktan A masuk ke dalam reaktor adalah C_{A0} dengan temperatur T_0 . Neraca massa komponen A keadaan tunak pada suatu segmen Δz dan Δr dalam reaktor dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{pmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{masuk} \\ \text{secara aksial} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{keluar} \\ \text{secara aksial} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{masuk} \\ \text{secara radial} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{keluar} \\ \text{secara radial} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{laju molar A} \\ \text{terkonsumsi} \\ \text{oleh reaksi} \end{pmatrix} = 0$$

Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} (2\pi r \Delta r) u_s (C_A|_z - C_A|_{z+\Delta z}) + \left(-\varepsilon D_{er} 2\pi r \Delta r \frac{\partial C_A}{\partial r} \Big|_r \right) - \\ \left(-\varepsilon D_{er} 2\pi (r + \Delta r) \Delta z \frac{\partial C_A}{\partial r} \Big|_{r+\Delta r} \right) - \\ \eta (2\pi r \Delta r \Delta z) \rho_B r_A = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Jika persamaan 1 diatas disusun dengan membagi ruas kiri dan kanan dengan $(2\pi r \Delta r \Delta z)$ dan diambil limit $\Delta z \rightarrow 0$ dan $\Delta r \rightarrow 0$, persamaan diatas menjadi :

$$\left(u_s \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) = \varepsilon D_{er} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) - \eta \rho_B r_A \quad (2)$$

Persamaan reaksi yang terjadi di permukaan katalis :

$$r_{As} = \eta \rho_B r_A \quad (3)$$

Persamaan peristiwa perpindahan massa dari fasa *bulk* ke permukaan katalis :

$$N_A = k_g a_v (C_A - C_{As}^s) \quad (4)$$

Pada keadaan tunak (*steady state*), laju konsumsi A untuk reaksi dipermukaan = laju perpindahan massa A dari fasa *bulk* ke interfasa.

$$\eta \rho_B r_A = k_g a_v (C_A - C_{As}^s) \quad (5)$$

$$\left(u_s \frac{\partial C_A}{\partial z}\right) = \varepsilon D_{er} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) - \quad (6)$$

$$k_g a_v (C_A - C_{A_s}^s)$$

Untuk menguji persamaan yang didapat dilakukan validasi, yaitu membandingkan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan diatas dengan data hasil eksperimen. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dengan model matematis yang telah disusun dengan data-data eksperimen yang dilakukan oleh Aboudheir, dkk (2006).

Jika hasil validasi sudah sesuai harapan (error < 10%) maka dilakukan simulasi dengan variable operasi untuk reaksi *steam reforming* etanol menjadi hydrogen yang umum digunakan. Untuk simulasi pengaruh variabel operasi terhadap konversi reaksi maka variabel bebas yang lain ditentukan tetap merujuk pada penelitian sebelumnya oleh Aboudheir dkk (2006) dan Akande dkk (2006).

Untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap konversi reaksi dilakukan simulasi dengan variasi temperatur dari 653 K hingga 743 K, rasio $H_2O/C_2H_5OH = 7,2$ dan kecepatan superficial = $0,263 \times 10^{-4}$ m/s.

Pengaruh kecepatan superficial terhadap konversi reaksi dalam simulasi yang dilakukan divariasikan dari $0,063 \times 10^{-4}$ hingga $0,423 \times 10^{-4}$ m/s dengan temperatur 743 K dan rasio $H_2O/C_2H_5OH = 7,2$.

Pengaruh konsentrasi C_2H_5OH terhadap konversi reaksi dalam simulasi yang divariasikan dari $5,71 \text{ mol/m}^3$ hingga $14,91 \text{ mol/m}^3$ dengan temperatur 743 K, rasio $H_2O/C_2H_5OH = 7,2$ dan kecepatan superficial $0,63 \times 10^{-5}$ m/s.

Pengaruh rasio H_2O/C_2H_5OH terhadap konversi reaksi, disimulasikan pada rasio 3 hingga 11 pada temperatur 743 K, kecepatan superficial $0,63 \times 10^{-5}$ m/s dan konsentrasi $9,713 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^3$.

Pengaruh panjang reaktor terhadap penurunan tekanan dalam simulasi yang divariasikan panjang reaktor 0,15 hingga

0,34 m pada temperatur 593 K, tekanan awal 3 atm, kecepatan superficial $2,63 \times 10^{-5}$ m/s dan diameter partikel katalis $0,6 \times 10^{-3}$ m dihitung dengan menggunakan persamaan Ergun (Froment & Bischoff, 1990).

$$\Delta p = \frac{150 v_s L (1 - \epsilon)^2 \mu}{\epsilon^2 D_p^2} + \frac{1.75 L \rho v_s^2 (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model dapat digunakan untuk memprediksi kinerja suatu reaktor, maka perlu dilakukan validasi model dengan data hasil eksperimen. Dalam hal ini akan dibahas mengenai validasi model dan simulasi pengaruh kondisi operasi terhadap koversi reaksi. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dengan model matematis yang telah disusun dengan data-data eksperimen yang dilakukan oleh Aboudheir, dkk (2006).

Tabel 1. Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Model

Komponen	Fraksi Mol Keluar Reaktor		% Ralat
	Model	Eksperimen*	
Etanol	0,0307	0,029	5,67
Air	0,8162	0,805	1,37
CO ₂	0,0382	0,043	11,05
H ₂	0,1148	0,123	6,67
Rata - rata			6,19

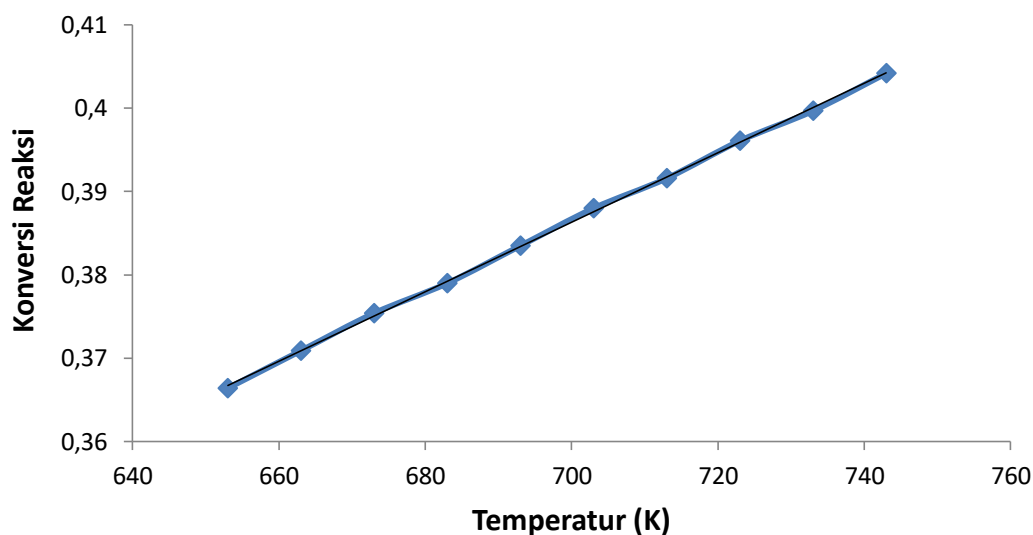
* Aboudheir, dkk (2006)

Perhitungan dengan model sesuai dengan hasil eksperimen yang dilakukan Aboudheir dkk., diperoleh hasil fraksi mol keluar reaktor yang tidak jauh berbeda. Dengan persen ralat yang kecil (6,19%), maka model layak digunakan untuk memperkirakan kinerja reaktor (Yan et al., 2014).

Reaksi *steam reforming* etanol pada reaktor unggun tetap merupakan sistem yang kompleks dengan berbagai variabel yang harus diperhitungkan, diantaranya temperatur, kecepatan superficial, dan rasio H_2O/C_2H_5OH .

Pengaruh Temperatur Terhadap Konversi Reaksi

Pengaruh temperatur berbanding lurus terhadap konversi reaksi seperti terlihat pada Gambar 3. Hal ini berkaitan dengan laju reaksi yang berbanding lurus dengan temperatur (persamaan Arrhenius), dimana seiring dengan kenaikan temperatur maka laju reaksi yang terjadi akan meningkat. Kenaikan temperatur dari 653 K hingga 743 K meningkatkan reaksi konversi reaksi dari 36,64% menjadi 40,42%. Galvita dkk (2001) menyebutkan bahwa kenaikan temperatur bisa menaikkan konversi etanol hingga 100%. Dilaporkan juga bahwa kenaikan temperatur dari 600 °C ke 700 °C dapat meningkatkan konversi etanol dari 92% ke 100% (Patel, Jindal, & Pant, 2013).



Gambar 3. Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Konversi Reaksi

Pengaruh Konsentrasi C_2H_5OH Terhadap Konversi Reaksi

Gambar 5. menunjukkan pengaruh konsentrasi C_2H_5OH berbanding lurus terhadap konversi reaksi dimana semakin besar konsentrasi C_2H_5OH yang terjadi

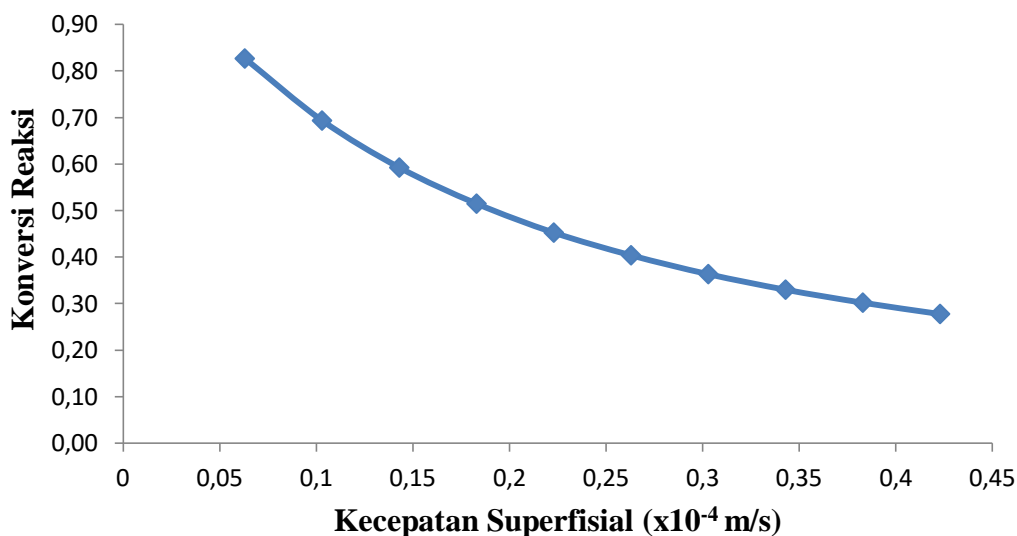
Pengaruh Kecepatan Superfisial Terhadap Konversi Reaksi

Gambar 4. menunjukkan pengaruh kecepatan superfisial berbanding terbalik terhadap konversi reaksi dimana kenaikan kecepatan superfisial menyebabkan konversi reaksi menurun. Kenaikan kecepatan superfisial dari $0,063 \times 10^{-4}$ m/s hingga $0,423 \times 10^{-4}$ m/s menghasilkan konversi reaksi turun dari 82,69% menjadi 27,81%.

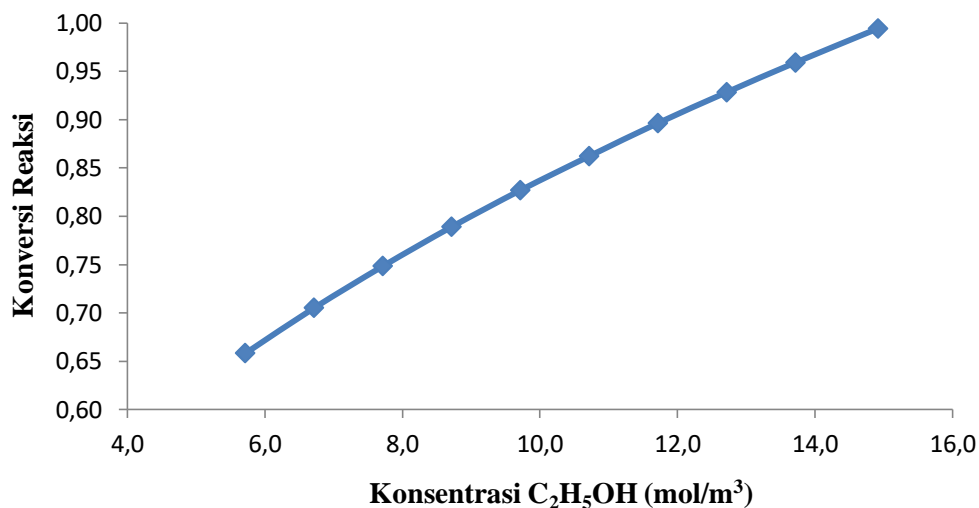
Dengan bertambahnya kecepatan superfisial maka waktu tinggal yang terjadi akan berkurang dan kontak antara reaktan dengan katalis berlangsung singkat sehingga mengakibatkan konversi yang dihasilkan juga semakin menurun (Patel et al., 2013).

maka konversi reaksi akan semakin meningkat.

Kenaikan konsentrasi dari $5,713 \text{ mol/m}^3$ hingga $14,913 \text{ mol/m}^3$ meningkatkan konversi reaksi dari 65,84% hingga 99,41%.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Kecepatan Superfisial terhadap Konversi Reaksi



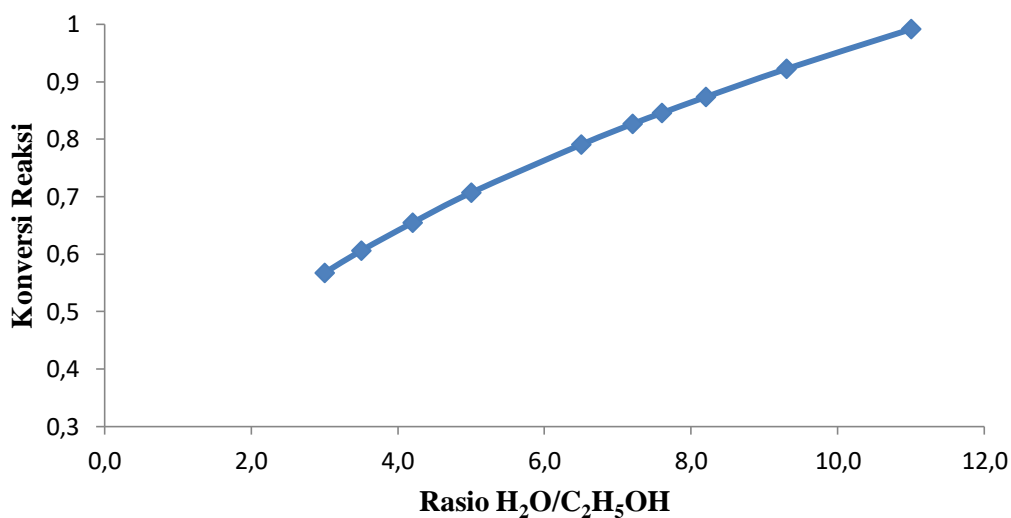
Gambar 5. Grafik Pengaruh Konsentrasi terhadap Konversi Reaksi

Pengaruh Konsentrasi Rasio H_2O/C_2H_5OH Terhadap Konversi Reaksi

Gambar 6 menunjukkan pengaruh rasio H_2O/C_2H_5OH berbanding lurus terhadap konversi reaksi. Peningkatan rasio H_2O/C_2H_5OH yang diberikan maka konversi reaksi akan semakin besar. Berdasarkan stokiometri reaksi, terlihat bahwa C_2H_5OH menjadi reaksi pembatas, sehingga semakin besar rasio maka C_2H_5OH

memiliki kesempatan untuk bereaksi dengan H_2O yang berlimpah sehingga C_2H_5OH yang terkonversi semakin besar.

Ketika konversi bertambah, reaksi juga meningkat karena bertambahnya jumlah H_2 hasil reaksi *steam reforming* C_2H_5OH . Hal ini sesuai dengan hasil eksperimen sebelumnya, ketika rasio H_2O/C_2H_5OH diperbesar maka konversi reaksi juga meningkat. (Aboudheir, 2006; V. Galvita dkk, 2001).

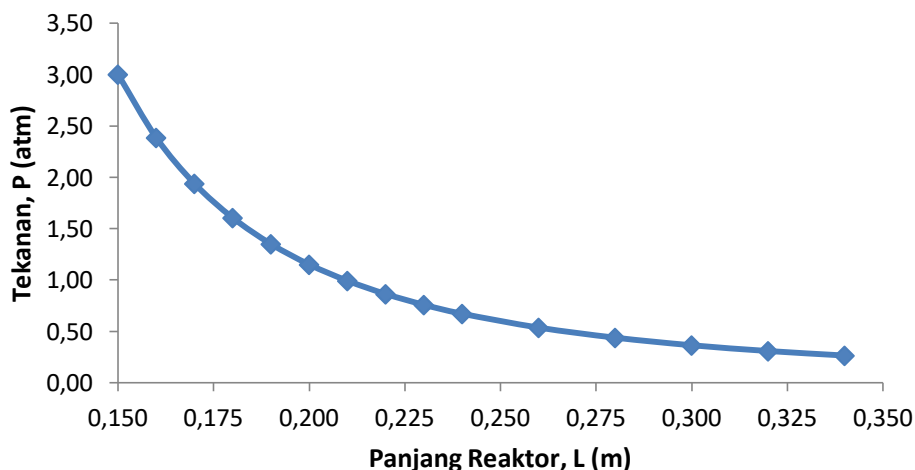


Gambar 6. Grafik Pengaruh Rasio H_2O/C_2H_5OH terhadap Konversi Reaksi

Pengaruh Panjang Reaktor Terhadap Penurunan Tekanan pada Reaktor Unggun Tetap

Gambar 7. menunjukkan pengaruh panjang reaktor berbanding terbalik

terhadap penurunan tekanan dimana semakin panjang ukuran reaktor maka tekanan sepanjang reaktor semakin menurun.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Panjang Reaktor terhadap Penurunan Tekanan

Pada panjang reaktor 0,15 hingga 0,21 m dengan nilai tekanan 2,986 menjadi 0,991 atm yang dapat digunakan untuk operasi reaktor. Sedangkan pada panjang reaktor dari 0,23 hingga 0,34 m dengan nilai tekanan 0,862 mejadi 0,26 atm reaktor tidak beroperasi dengan baik atau tidak beroperasi, hal ini dikarenakan nilai tekanan yang jauh di bawah 1,0 atm (tekanan vakum).

KESIMPULAN

Analisis kinerja reaktor unggun tetap untuk produksi hidrogen melalui reaksi *steam reforming* etanol dengan model matematis dapat dilakukan dengan baik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa beberapa faktor yang mempengaruhi reaksi *steam reforming* etanol untuk memproduksi hidrogen yaitu temperatur, konsentrasi etanol, rasio H_2O/C_2H_5OH dan kecepatan superfisial. Untuk mendapatkan

hydrogen yang maksimal maka kondisi operasi reaksi steam reforming etanol dilakukan pada temperatur tinggi (743 K), konsentrasi etanol tinggi ($1,49 \times 10^{-4}$ mol/m³) dan rasio H₂O/C₂H₅OH tinggi (11,0) dan kecepatan superfisial yang rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboudheir, A., Akande, A., Idem, R., & Dalai, A. (2006). Experimental studies and comprehensive reactor modeling of hydrogen production by the catalytic reforming of crude ethanol in a packed bed tubular reactor over a Ni/Al₂O₃ catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(6), 752–761. doi:10.1016/j.ijhydene.2005.06.020
- Abdurrahman, S. (Ed.). (2016). Outlook Energi Indonesia 2016. Jakarta. Retrieved from https://www.esdm.go.id/assets/media/content/outlook_energi_indonesia_2016_opt.pdf
- Akande, A., Aboudheir, A., Idem, R., & Dalai, A. (2006). Kinetic modeling of hydrogen production by the catalytic reforming of crude ethanol over a co-precipitated Ni - Al₂O₃ catalyst in a packed bed tubular reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(12), 1707–1715. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.01.001>
- Arteaga, L. E., Peralta, L. M., Casas, Y., & Castro, D. (2009). Optimal Design, Modeling and Simulation of an Ethanol Steam Reforming Reactor. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.2202/1542-6580.2059>
- ASIF, M., & MUNEEB, T. (2007). Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1388–1413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.004>
- Boyer, C., Volpi, C., & Ferschneider, G. (2007). Hydrodynamics of trickle bed reactors at high pressure: Two-phase flow model for pressure drop and liquid holdup, formulation and experimental validation. *Chemical Engineering Science*, 62(24), 7026–7032. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.08.036>
- Bshish, A., Yaakob, Z., Narayanan, B., Ramakrishnan, R., & Ebshish, A. (2011). Steam-reforming of ethanol for hydrogen production. *Chemical Papers*, 65(3), 251–266. <https://doi.org/10.2478/s11696-010-0100-0>
- Cortright, R. D., Davda, R. R., & Dumesic, J. a. (2002). Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water. *Nature*, 418(6901), 964–967. <https://doi.org/10.1038/nature01009>
- Dutta, S. (2014). A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1148–1156. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.037>
- Froment, G. F., & Bischoff, K. B. (1990). *Chemical reactor analysis and design* (2nd ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., & Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139(4), 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.08.039>
- Kumar, A., Prasad, R., & Sharma, Y. C. (2014). Steam Reforming of Ethanol: Production of Renewable Hydrogen. *International Journal of*

- Environmental Research and Development*, 4(3), 203–212.
- Mazloomi, K., & Gomes, C. (2012). Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3024–3033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.028>
- Mazzone, L. C. A., & Fernandes, F. A. N. (2006). Modeling of Fischer-Tropsch synthesis in a tubular reactor. *Latin American Applied Research*, 36(3), 141–148. [https://doi.org/10.1016/S1003-9953\(07\)60035-8](https://doi.org/10.1016/S1003-9953(07)60035-8)
- Patel, M., Jindal, T. K., & Pant, K. K. (2013). Kinetic study of steam reforming of ethanol on Ni-based ceria-zirconia catalyst. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(45), 15763–15771. <https://doi.org/10.1021/ie401570s>
- Pinton, N., Vidal, M. V., Signoreto, M., Martínez-Arias, A., & Cortés Corberán, V. (2017). Ethanol steam reforming on nanostructured catalysts of Ni, Co and CeO₂: Influence of synthesis method on activity, deactivation and regenerability. *Catalysis Today*, 296(June), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.06.022>
- Rabenstein, G., & Hacker, V. (2008). Hydrogen for fuel cells from ethanol by steam-reforming, partial-oxidation and combined auto-thermal reforming: A thermodynamic analysis. *Journal of Power Sources*, 185(2), 1293–1304. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.08.010>
- Sadooghi, P., & Rauch, R. (2015). Experimental and modeling study of hydrogen production from catalytic steam reforming of methane mixture with hydrogen sulfide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(33), 10418–10426. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.143>
- Tripodi, A., Compagnoni, M., Ramis, G., & Rossetti, I. (2017). Process simulation of hydrogen production by steam reforming of diluted bioethanol solutions: Effect of operating parameters on electrical and thermal cogeneration by using fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(37), 23776–23783. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.056>
- Yan, C.-F., Ye, W., Guo, C.-Q., Huang, S.-L., Li, W.-B., & Luo, W.-M. (2014). Numerical simulation and experimental study of hydrogen production from dimethyl ether steam reforming in a micro-reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(32), 18642–18649. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.133>